

文章编号: 0258-7025(2010)07-1837-08

# 多点分层差动激光多普勒自身测速仪的研究

周 健 龙兴武

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 针对加速度表存在受过载影响的误差项和累计误差, 提出多点分层式差动激光多普勒自身测速仪(LDV), 为车载导航系统提供自身的速度参数。阐述了激光多普勒测量自身速度的基本原理, 设计了多点分层差动 LDV, 并运用跟踪滤波和数字自相关技术对多普勒信号进行处理。理论分析和实验结果表明, 多点分层差动 LDV 解决了双光束不能进行离焦测量的难题; 跟踪滤波器实时跟踪多普勒信号, 去除基底信号并抑制通带外噪声, 数字自相关技术去除残留噪声, 提高了信噪比和系统的灵敏度。与全球定位系统(GPS)的测量结果比较, 系统的相对测量精度约为 2%。

**关键词** 激光技术; 激光多普勒自身测速; 离焦测量; 跟踪滤波; 数字自相关; 车载导航

中图分类号 TN249; TH824 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1837

## Research on Multipoint Layer-Type Laser Doppler Self-Velocimeter

Zhou Jian Long Xingwu

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** An idea of using multipoint layer-type laser Doppler self-velocimeter (LDV) to offer velocity for vehicle navigation system is proposed, because the accelerometer has the error term generated by overload. The principle of measuring its own velocity with laser Doppler is expounded while multipoint layer-type LDV is designed. And Doppler signal is processed with the technique of tracking filter and digital autocorrelation. The results of theory and experiment show that, multipoint layer-type LDV can solve the problem that dual-beam LDV can not measure the velocity while out of focus. Background signal and part of noise in the passband are restrained by tracking filter, and residual noise is removed by digital autocorrelator so that the signal-to-noise and sensibility of the system are raised. Comparing with global position system (GPS), the relative accuracy of the system is about 2%.

**Key words** laser technique; laser Doppler self-velocimeter; measuring out of focus; tracking filter; digital autocorrelation; vehicle navigation

## 1 引 言

自从 1964 年 Yeh 等证实了可利用激光多普勒频移技术来确定流体速度, 激光多普勒自身测速仪(LDV)就以其精度高、线性度好、动态响应快、测量范围大及非接触测量等特点在航天、航海、机械、能源等领域得到快速的发展<sup>[1~4]</sup>。

LDV 常见的测量模式有三种: 参考光模式、自混合模式及双光束差动模式。其中参考光模式的多普勒信号与接收方向有关, 而且探测器孔径的大小

也会影响信号的测量精度; 自混合模式, 由于它是通过检测激光器光强的波动频率进行测量的, 所以当工作电流和外界温度发生改变时, 光强也会相应地改变, 这对多普勒频率测量精度的影响很大; 而双光束差动模式, 多普勒信号与接收方向无关, 探测器的孔径可以任意增大, 而且激光光强的波动只会影响信号的信噪比, 并不会影响测量精度。双光束差动 LDV 的诸多优点使其在气体、液体的流速测量及固体表面运动速度的测量等多种场合得到广泛的应

收稿日期: 2009-09-01; 收到修改稿日期: 2009-11-19

基金项目: 国家科技预研基金(51309050301)资助课题。

作者简介: 周 健(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光学检测技术方面的研究。E-mail: wttzhoujian@163.com

导师简介: 龙兴武(1958—), 教授, 博士生导师, 主要从事激光和光电子技术等方面的研究。E-mail: xwlong110@sina.com

用。但是双光束模式要求被测物体处于两光束的交汇处(称为控制体),一旦被测物体离开控制体,多普勒信号就会丢失,即双光束不能进行离焦测量,这大大限制了其应用范围。

另外,传统的激光多普勒测速仪都是测量其他物体的速度,如管道流场的速度<sup>[5]</sup>、微机电系统谐振面内的运动速度<sup>[6]</sup>和硬目标的转速<sup>[7,8]</sup>等。目前,用于测量自身速度的 LDV 国内外鲜见报道。本文设计了多点分层差动 LDV,使双光束模式可以进行离焦测量,并且将其用于车载自主导航系统,实现自身速度的测量。

## 2 差动 LDV 的基本原理

如图 1 所示,当车载系统相对于地面以一定的速度  $\mathbf{v}$  运动时,车上的一整套光学系统相对于地面的运动速度也是  $\mathbf{v}$ ,此时运动的光源发出频率为  $f_0$  的一束光被分光和会聚系统分成两束光  $W_1$  和  $W_2$ ,入射到地面上的粒子  $P$  上。根据多普勒效应可知,粒子  $P$  接收到光的频率分别为

$$f_{P1} = f_0(1 + \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_1/c), \quad (1)$$

$$f_{P2} = f_0(1 + \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_2/c), \quad (2)$$

式中  $\mathbf{e}_1$  和  $\mathbf{e}_2$  分别为光束  $W_1$  和  $W_2$  方向上的单位矢量。

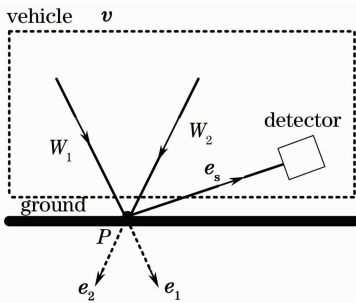


图 1 双光束分析模型

Fig. 1 Analysis model of dual-beam

几乎同时,运动的光检测器接收静止粒子  $P$  的散射光,同样,散射光中包含两种频率成分,分别为

$$f_{D1} = f_{P1}(1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_s/c) \approx f_0[1 + \mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_s)/c], \quad (3)$$

$$f_{D2} = f_{P2}(1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_s/c) \approx f_0[1 + \mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_2 - \mathbf{e}_s)/c], \quad (4)$$

式中  $\mathbf{e}_s$  为粒子  $P$  到光检测器方向上的单位矢量。因此,多普勒频率为

$$f_D = |f_{D1} - f_{D2}| = |\mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2)|/\lambda, \quad (5)$$

式中  $\lambda$  是光源出射激光的波长。

由(5)式可知,多普勒频率与车载系统的运动速

度成正比,因此通过探测多普勒频率就可以推算载体的运动速度。

## 3 多点分层差动 LDV 的光路设置

### 3.1 差动 LDV 的光路布置

光路布置如图 2 所示,He-Ne 激光器的输出功率为 9 mW,出射激光经过准直镜准直后,被分光棱镜分成等强度、等光程的两束光。由于控制体的体积与光束直径的立方成反比<sup>[9]</sup>,所以为了增大控制体的体积,使用光束压缩镜缩小两光束的直径。压缩后两光束的直径为  $d$ ,间距为  $L$ ,通过光阑,由焦距为  $f_1$  的透镜 1 将其会聚于地面上,这样光束的夹角为  $\kappa = 2\arctan[L/(2f_1)]$ 。由(5)式可知,这里多普勒频率为

$$f_D = \frac{v}{\lambda} 2\sin \frac{\kappa}{2}. \quad (6)$$

因此,载体的运动速度为

$$v = \frac{\lambda f_D}{2\sin(\kappa/2)}. \quad (7)$$

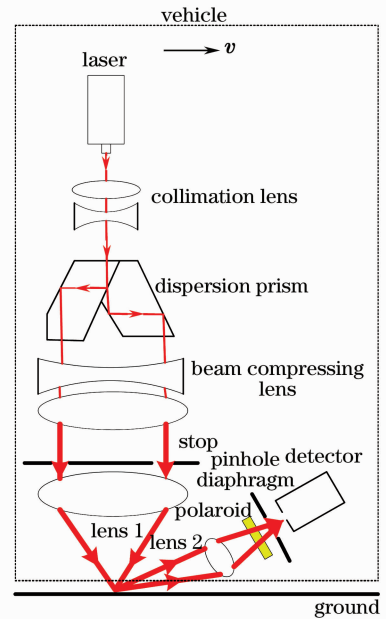


图 2 差动激光多普勒自身测速仪的光路布置

Fig. 2 Setup dual-beam LDV

焦距为  $f_2$  的透镜 2 收集会聚点的散射光,并将会聚点成像于雪崩二极管模块的光敏面上。雪崩二极管模块输出的多普勒信号,由数据采集卡 PCI DAS-4020 进行实时采集,同时对采集的信号进行跟踪滤波、自相关去噪及快速傅里叶变换(FFT),而图中小孔光阑和滤光片的作用是减小背景光噪声。

### 3.2 多点分层式激光多普勒测速系统的结构

双光束模型控制体的长度<sup>[9]</sup>为

$$l_m = \frac{4\lambda f_1}{\pi d \sin(\kappa/2)}, \quad (8)$$

即单个探头测量的有效高度为  $0 \sim l_m$  (假设控制体最下端的高度为 0)。在实际的光学系统中, 选择合适的光学参数,  $l_m$  可以达到厘米量级, 甚至更大。当地面在这个高度范围内, 则存在多普勒信号; 当地面不在这个高度范围内, 多普勒信号就会丢失, 无法进行速度测量。针对这一特点, 利用多个探头设计

了多点分层式激光多普勒测速系统。将多个探头在垂直于地面的方向上依次分层分布在车载系统中的不同部位, 即固定探头 1 使其控制体的高度范围为  $0 \sim l_m$ , 固定探头 2 使其控制体的高度范围为  $l_m \sim 2l_m \dots$  依此类推, 固定探头  $n$  使其控制体的高度范围为  $(n-1)l_m \sim nl_m$ , 如图 3 所示。

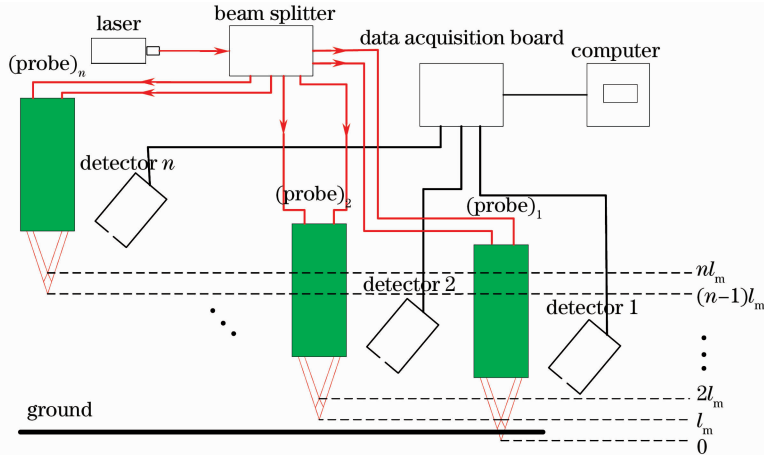


图 3 多点分层式激光多普勒测速系统的结构

Fig. 3 Schematic figure of multilayer LDV

当车载自主导航系统在平坦的地面上行驶时, 由于车式载体本身的振动, 使得地面离各个探头的距离不停地变化。若地面处于探头 1 的测控体内, 只有探测器 1 输出的信号为对应的多普勒信号, 其他探头均处于离焦状态, 没有多普勒信号输出; 若地面处于探头 2 的测控体内, 只有探测器 2 输出的信号为对应的多普勒信号, 同样其他探头均处于离焦状态, 没有多普勒信号输出……只要对各个探头输出的信号实时地进行信号判别, 就可以从中选出一组有用的多普勒信号, 对多普勒信号进行谱分析就可求出车载系统的运动速度。

当车载自主导航系统在凹凸不平的地面上行驶时, 地面上可能有不同的点处于不同探头的控制体内, 所以会有两个或两个以上的探头有多普勒信号输出。同样对各个探头输出的信号进行信号判别, 选出若干组有用的多普勒信号, 对这些多普勒信号分别进行谱分析, 将得到的若干个多普勒频率的均值作为输出结果, 以减小测量误差。

这样, 无论车式载体如何振动, 地面如何颠簸, 总会有一组或多组有效的多普勒信号存在, 即这种多点分层式双光束系统可以有效地进行离焦测量。

## 4 多普勒信号处理

由于多普勒信号中还包含着基底信号和各种噪声, 所以对多普勒信号进行谱分析之前需要进行滤波处理。然而 LDV 中多普勒频率随着车载系统运动速度的变化而不停地改变, 因此系统中固定通频带的滤波器就不能满足激光多普勒测速仪对滤波性能的要求。针对这一特点, 设计了跟踪滤波器, 对跟踪滤波后的多普勒信号进行相关去噪, 去除跟踪滤波器通带内的残留噪声, 最后再利用 FFT 对有效的多普勒信号进行频谱分析, 从频谱中提取多普勒频率, 求得车载系统的运动速度。信号处理的流程如图 4 所示。

跟踪滤波器的实质就是使滤波器的通频带与前一时刻的多普勒频率之间建立联系, 从而达到无论多普勒频率如何变化, 其始终在跟踪滤波器的通频带的范围内。具体的做法如下: 数据采集卡采集多普勒信号, 先通过加 hanning 窗的 FFT, 求得其频谱, 并利用比值法频谱校正技术修正频谱图中峰值谱的位置, 从而求得的多普勒频率。根据求得的多普勒频率值调整下一时刻带通滤波器的上、下限截止频率, 从而使下一时刻的多普勒频率始终被滤波器的通频带所包含, 其信号处理的流程如图 5 所示。

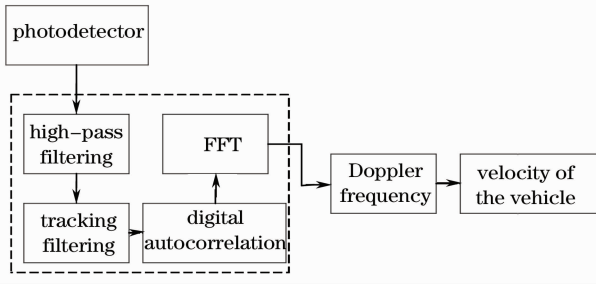


图 4 多普勒信号处理流程图

Fig. 4 Flowchart of Doppler signal processing

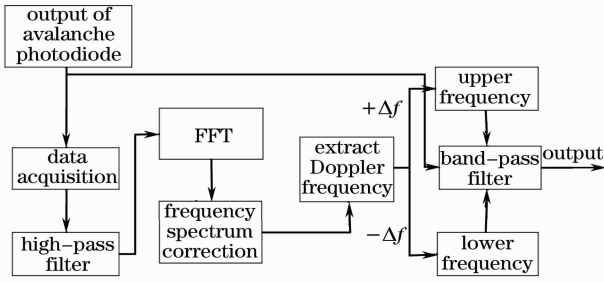


图 5 多普勒信号跟踪滤波的结构框图

Fig. 5 Structure chart of tracking filter for Doppler signal

### 5 实验结果与分析

将车载系统放在平整的地面上,人工推小车使其在地面上保持直线运动,这样车载系统的运动速度可以人为控制,便于实验。同时运用多点分层

差动 LDV 和全球定位系统(GPS)同时测量车式载体相对于地面的运动速度。这里多点分层差动 LDV 的每个探头中,透镜焦距  $f_1$  为 800 mm,压缩后光束的直径  $d$  为 0.016 mm,两光束的间距  $L$  为 14 mm,则由(8)式可知单个探头控制体的长度  $l_m$  约为 4.55 mm;同时设置探头 1 距地面的高度为 4.5 mm,探头 2 距地面的高度为 9 mm。实验中选用较高精度的 GPS-OEM 板接收机,其主要导航性能指标列于表 1,所以可以用其测量值作为速度标准,计算 LDV 测量的相对精度。

表 1 GPS-OEM 板接收机主要性能指标

Table 1 Performance criteria of GPS-OEM receiver

| Parameters                      |                 | Index of performance |
|---------------------------------|-----------------|----------------------|
| Start time                      | Warm start /s   | 15                   |
|                                 | Search sky /min | 5                    |
| Re-capture time /s              |                 | <2                   |
| Data update rate /Hz            |                 | 1                    |
| Positioning accuracy /m         |                 | <15                  |
| Accuracy of velocity /(m/s)     |                 | 0.01                 |
| Upper limit of velocity /(km/h) |                 | 1850                 |
| Upper limit of accelerate /g    |                 | 6                    |

#### 5.1 信号判别

实验中使用两个探头,在一个采样周期(1024 个点)内,对每个探头的输出信号进行 FFT,根据信号频谱中是否出现明显的尖峰来判断多普勒信号有效与否。图 6 为实验中探头 1 和探头 2 的输出信号及其频谱。

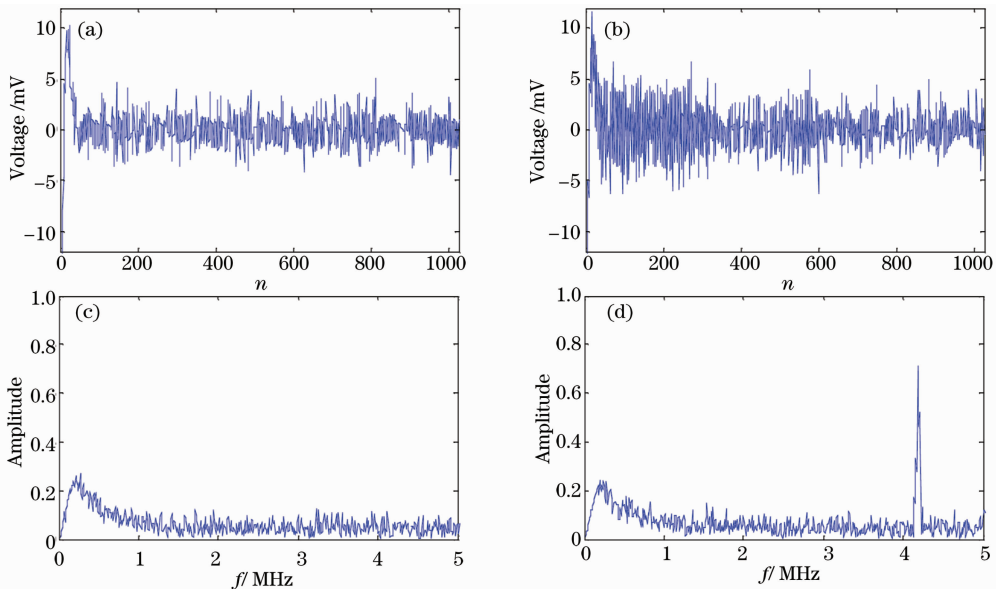


图 6 输出信号及 FFT 结果。(a)探头 1 的输出信号;(b)探头 2 的输出信号;(c)探头 1 输出信号的频谱;(d)探头 2 输出信号的频谱

Fig. 6 Results of the output and FFT. (a) output of probe 1; (b) output of probe 2; (c) spectrum of the output of probe 1; (d) spectrum of the output of probe 2

由图 6(c)和(d)可以看出,探头 1 输出信号的频谱中并没有明显的尖峰,而探头 2 输出信号的频谱中存在明显的尖峰,对应的频率为 4.18 MHz。由此可知,由于地面在竖直方向上小的起伏,使得探头 1 处于离焦状态,多普勒信号丢失,探头 2 输出信号为有效的多普勒信号,其对应的频率可以作为多普勒频率求解车式载体的运动速度。

## 5.2 跟踪滤波器

分别运用普通带通滤波器和跟踪滤波器对多普勒信号进行实测研究,其中跟踪滤波器的半通带宽度为 100 kHz,普通滤波器的通带为 1.5~2 MHz,设定数据采集卡的采样频率为 10 MHz,采样点数(分析数据长度)为 1024。当车载系统相对于地面以某一速度运动时,GPS 测得的速度值为 3.563 m/s,所对应的多普勒频率为 1.573 MHz,原始多普勒信号、两种滤波器的输出信号及其频谱如图 7 所示。

人为改变车式载体的运动速度,从而改变对应多普勒信号的频率,使其不在普通滤波器的通带范围内。当 GPS 测得的速度值为 5.701 m/s,对应的多普勒频率为 2.546 MHz 时,原始多普勒信号、两种滤波器的输出信号及其频谱如图 8 所示。

当 GPS 测得的速度值为 6.861 m/s,对应多普勒频率为 3.064 MHz 时,原始多普勒信号、两种滤

波器的输出信号及其频谱如图 9 所示。

对实测信号组图做详细分析如下:由图 7~9 中原始信号可知,多普勒信号中与直流分量相比,多普勒频率项较小,原始信号频谱图中的第一个峰值是直流项,右边的小尖峰才是多普勒频率项。由图 7 可知,原始多普勒信号中含有基底信号和大量的噪声,由于多普勒频率在普通滤波器的通带范围内,因此两种滤波器都能达到滤除基底信号和部分噪声,提高信噪比的目的,且峰值谱所对应的多普勒频率的位置相同,与多普勒频率的真实值相一致。由图 8 可知,多普勒频率已经越过了普通滤波器的通带,对普通滤波器来说,虽然基底信号被滤除,但多普勒频率项的幅度也被大大地衰减,而且频谱图中通带内形成的次峰值谱已经非常接近峰值谱,对多普勒频率的测量有一定的影响,而对跟踪滤波器来说,基底信号及系统的部分噪声被很好地滤除,多普勒频率项被很好地保留,其信噪比大大改善,且峰值谱对应的位置的频率与多普勒频率的真实值一致。由图 9 可知,多普勒频率远离普通滤波器的通带,此时,普通滤波器通带内形成了峰值谱,严重影响多普勒频率项频谱位置的判别,从而导致得出错误的结果,而跟踪滤波器没有受到任何影响,能够适用于多普勒信号的处理。

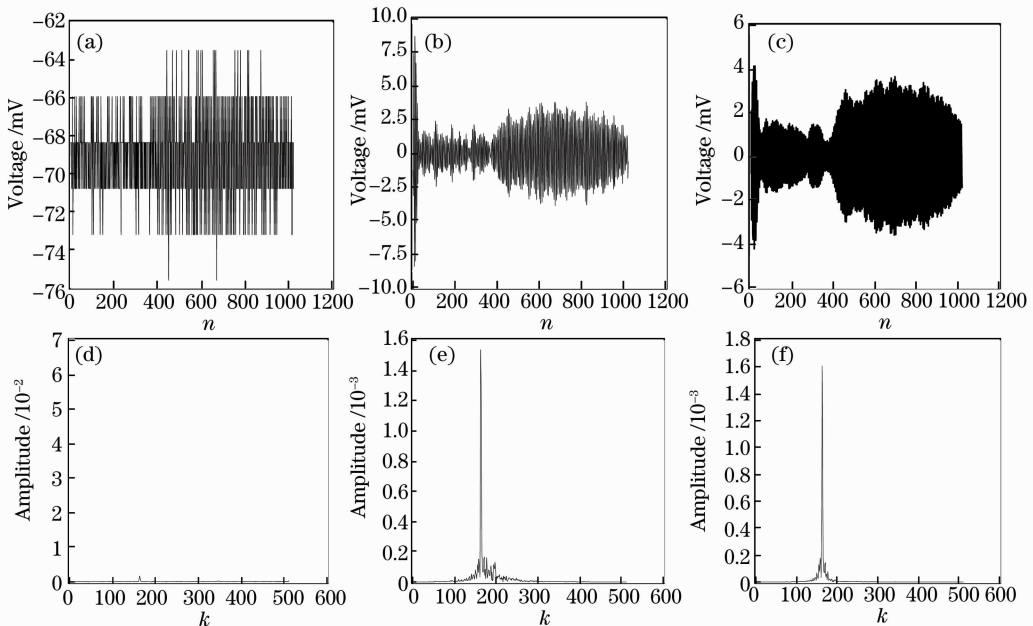


图 7 多普勒频率为 1.573 MHz 时的结果。(a)原始信号;(b)固定通带滤波器输出信号;(c)跟踪滤波器输出信号;

(d)原始信号的频谱;(e)固定通带滤波器输出信号频谱;(f)跟踪滤波器输出信号频谱

Fig. 7 Results when Doppler frequency is 1.573 MHz. (a)initial Doppler signal; (b)output of common band-pass filter; (c) output of tracking filter; (d) frequency spectrum of the initial Doppler signal; (e) frequency spectrum of the output of common band-pass filter; (f)frequency spectrum of the output of tracking filter

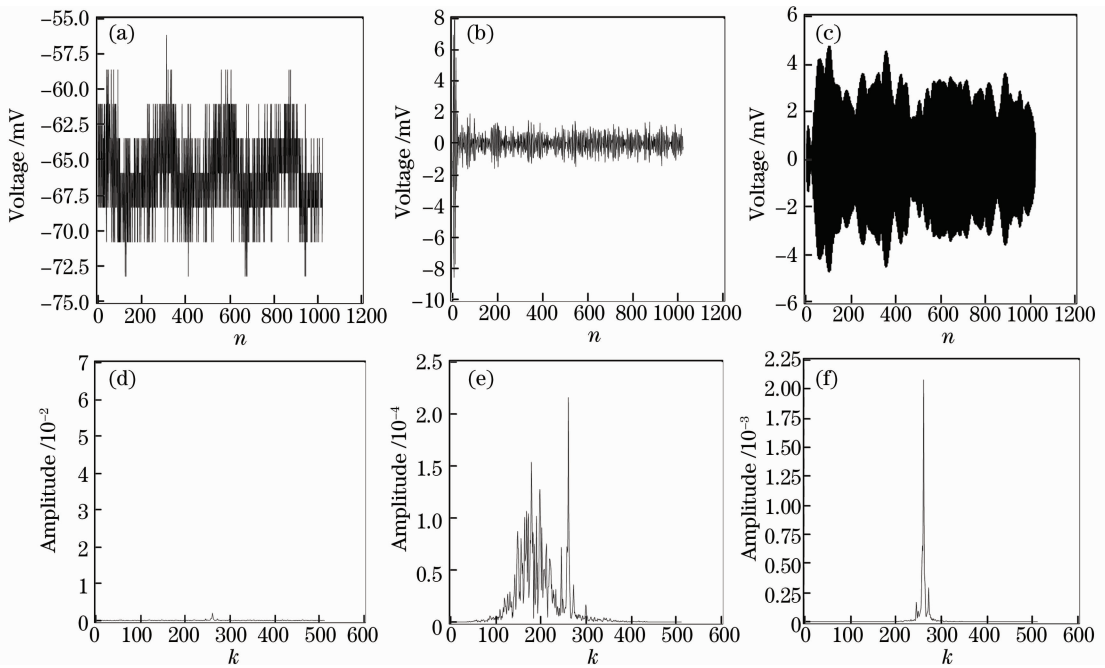


图 8 多普勒频率为 2.546 MHz 时的结果。(a)原始信号;(b)固定通带滤波器输出信号;(c)跟踪滤波器输出信号;  
(d)原始信号的频谱;(e)固定通带滤波器输出信号频谱;(f)跟踪滤波器输出信号频谱

Fig. 8 Results when Doppler frequency is 2.546 MHz. (a)initial Doppler signal; (b)output of common band-pass filter; (c) output of tracking filter; (d) frequency spectrum of the initial Doppler signal; (e) frequency spectrum of the output of common band-pass filter; (f)frequency spectrum of the output of tracking filter

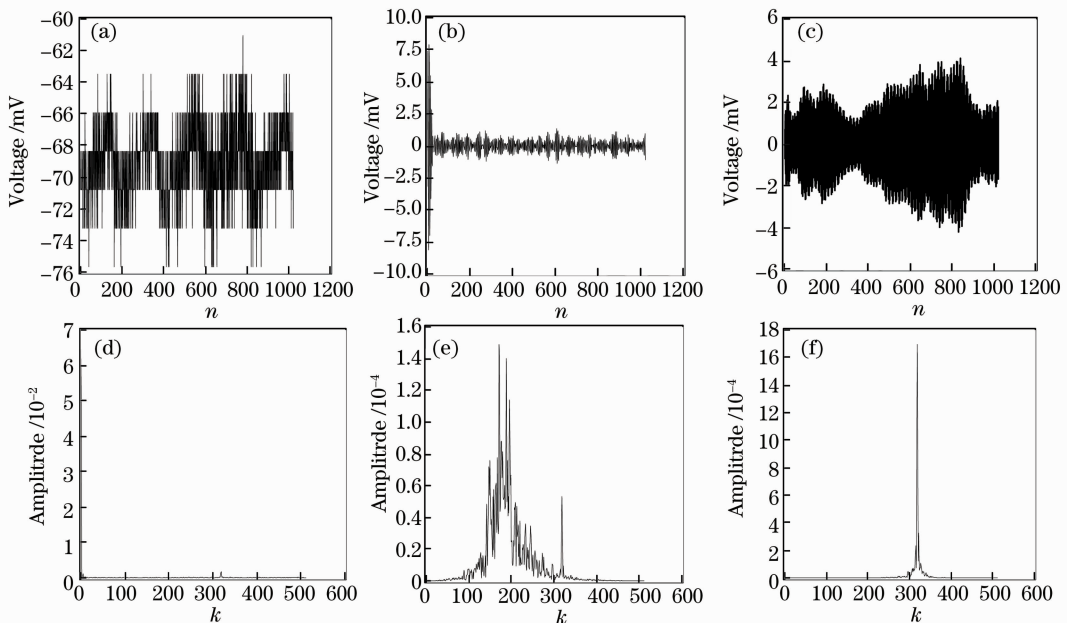


图 9 多普勒频率为 3.064 MHz 时的结果。(a)原始信号;(b)固定通带滤波器输出信号;(c)跟踪滤波器输出信号;  
(d)原始信号的频谱;(e)固定通带滤波器输出信号频谱;(f)跟踪滤波器输出信号频谱

Fig. 9 Results when Doppler frequency is 3.064 MHz. (a)initial Doppler signal; (b)output of common band-pass filter; (c) output of tracking filter; (d) frequency spectrum of the initial Doppler signal; (e) frequency spectrum of the output of common band-pass filter; (f)frequency spectrum of the output of tracking filter

另外,在 LabVIEW 平台中,利用顺序结构和通用库中的时间计数器子 VI 可记录跟踪滤波前后的

时刻,两者之差即为跟踪滤波所花费的时间。本实验中结果显示为 2 ms,而跟踪滤波器的半通带宽度

为 100 kHz [由 (7) 式可知, 对应的速度为 0.22 m/s], 也就是说只要在 2 ms 内速度的变化值不超过 0.22 m/s, 多普勒信号就不会丢失。则跟踪滤波要求加速度的范围为  $-110 \sim 110 \text{ m/s}^2$ , 而普通车辆的加速度一般不超过  $8 \text{ m/s}^2$  (如宝马 7 系列最大加速度为  $6.7 \text{ m/s}^2$ ), 所以所设计的跟踪滤波器完全可以满足 LDV 的要求。

### 5.3 自相关去噪

运用数字自相关技术处理跟踪滤波后的多普勒信号, 其结果如图 10 所示。

由图 10(c) 可知, 自相关前的信号中在跟踪滤

波器通带外的噪声被大大衰减, 而其通带内仍存在大量的噪声; 由图 10(d) 可知, 数字自相关技术不仅使通带内的噪声得到很大程度衰减, 而且也抑制了通带外残留的噪声。这是因为噪声与噪声、信号与噪声互不相关, 所以自相关函数中这两项的相关函数均很小, 且随采样点数的增加而趋近于 0; 而信号之间具有很强的相关性, 且自相关信号的频率与原信号的频率相同<sup>[10]</sup>。所以数字自相关技术在不改变信号频率的基础上, 有效地抑制了跟踪滤波器残留的噪声, 使多普勒信号的信噪比大大增加。

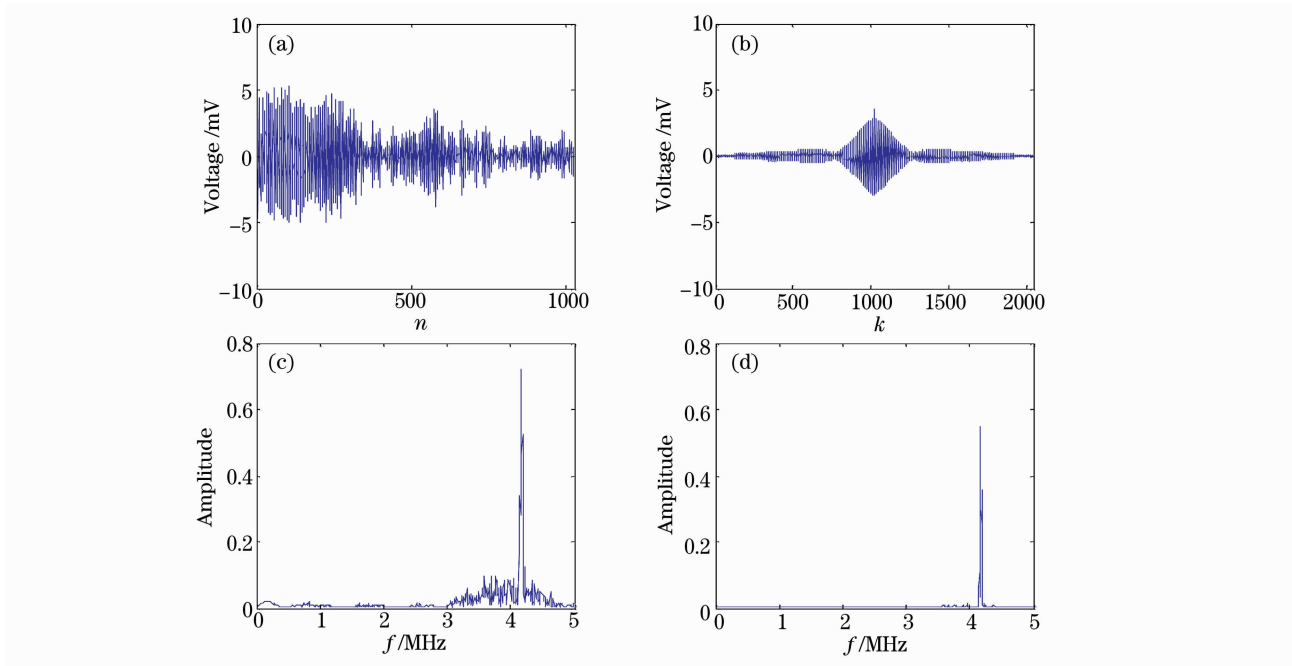


图 10 自相关去噪的结果。(a)自相关前的信号;(b)自相关后的信号;  
(c)自相关前信号的频谱;(d)自相关后信号的频谱

Fig. 10 Results of denoising with autocorrelation. (a)signal before autocorrelation; (b)signal after autocorrelation; (c)spectrum of signal before autocorrelation; (d)spectrum of signal after autocorrelation

### 5.4 测量结果比较

运用所设计的 LDV 和 GPS 同时对车载系统的运动速度进行测量, 结果如图 11 所示。

由图 11 可知, LDV 测量的结果与 GPS 的测量结果相一致, 测速的相对误差约为 2%。因此, 将多点分层差动 LDV 运用于车载导航系统切实可行。

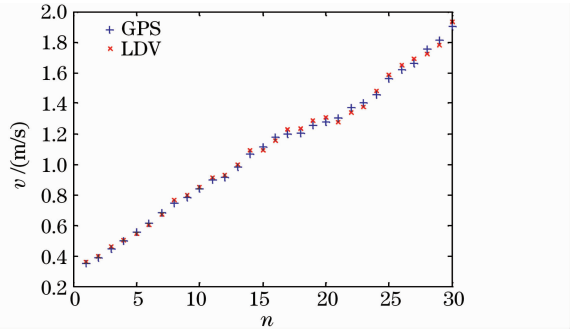


图 11 LDV 与 GPS 测量结果的比较

Fig. 11 Result comparisons between LDV and GPS

## 6 结 论

理论分析和实验表明, 多点分层技术在保留双光束 LDV 测量优点的同时, 解决了其进行离焦测量的难题, 可有效测量车式载体自身的运动速度。跟踪滤

波及数字自相关技术去除了大量的噪声, 提高了多普勒信号的信噪比, 增强了系统的探测能力。综上所述

述,一方面,将多点分层差动 LDV 应用于车载导航系统已成为可能;另一方面,由粗糙地面形成的散斑对测量精度影响还需要进一步做深入的研究。

### 参 考 文 献

- 1 D. B. Brayton, H. T. Kalb, F. L. Crosswy. Two-component dual-scatter laser Doppler velocimeter with frequency burst signal readout [J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(6): 1145
- 2 A. K. Ziarami, A. Konrad. A method of extraction of sinusoids of characteristics [J]. *IEEE T. Circuits and System*, 2002, **14**: 124~131
- 3 He Yan, Shang Jianhua, Liu Dan *et al.*. Heterodyne laser Doppler vibrometer for underwater acousto-optic communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 189~192  
贺岩,尚建华,刘丹等.用于水下声光通信的外差式激光多普勒振动计[J].*中国激光*,2009,**36**(1): 189~192
- 4 Zhang Haiyang, Zhao Changming, Jiang Qijun *et al.*. Laser detection on micro-Doppler effect in coherent ladar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1981~1985  
张海洋,赵长明,蒋奇君等.基于相干激光雷达的激光微多普勒探测[J].*中国激光*,2008,**35**(12): 1981~1985
- 5 Liu Changwen, Lu Yao, Liu Jie *et al.*. A spectrum-analyzing laser Doppler velocimetric system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(5): 52~55  
刘昌文,陆尧,刘杰等.频谱分析型激光测速系统[J].*光电工程*,2004,**31**(5): 52~55
- 6 Zhong Ying, Zhang Guoxiong, Zhang Tao *et al.*. Application of time-frequency analysis in laser Doppler signal processing [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(2): 281~282  
钟莹,张国雄,张涛等.时频分析在激光多普勒信号处理中的应用[J].*光学技术*,2007,**33**(2): 281~282
- 7 Wang Zhongkai, Bi Jianmin, Zhou Xin *et al.*. Investigation on dual-beam Doppler speedometer based on CO<sub>2</sub> lasers [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(2): 183~185  
王忠凯,毕建民,周昕等.激光多普勒双光束横向测速技术研究[J].*激光技术*,2006,**30**(2): 183~185
- 8 Song Bao'an, Zhao Weijiang, Ren Deming *et al.*. Velocity measurement of hard target in angle-tuned Doppler wind lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 787~791  
宋宝安,赵卫疆,任德明等.角度调谐的多普勒激光雷达硬目标转速测量[J].*光学学报*,2008,**28**(4): 787~791
- 9 Shen Xiong. *Laser Doppler Velocimetry and Its Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 23~25  
沈熊.激光多普勒技术及其应用[M].北京:清华大学出版社,2004. 23~25
- 10 Zhou Jian, Long Xingwu, Wei Guo *et al.*. The application of digital correlation technology in laser Doppler velocimeter [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(3): 28~29  
周健,龙兴武,魏国等.数字相关技术在激光多普勒测速仪中的应用[J].*激光杂志*,2009,**30**(3): 28~29